

CarOLO - Navigation und Karte im DARPA Urban Challenge

Team der TU Braunschweig

Dipl.-Ing. Tobias Nothdurft, Dipl.-Ing. Andreas Sasse, Prof. Dr.-Ing. Peter Hecker

{ t.nothdurft, a.sasse, p.hecker }@tu-bs.de

Institut für Flugführung, Technische Universität Braunschweig

Tel.: 0531 / 391 - 9802, Fax: 0531 / 391 - 9804

1 Einleitung

Die Technische Universität Braunschweig, vertreten durch fünf Institute der Informatik, Elektrotechnik und des Maschinenbaus, hat 2007 erfolgreich an der DARPA Urban Challenge teilgenommen. Dem CarOLO Team mit insgesamt 14 wissenschaftlichen Mitarbeitern ist es gelungen, innerhalb eines Jahres das Experimentalfahrzeug „Caroline“ aufzubauen.

In der vorliegenden Ausarbeitung soll im Wesentlichen die Funktionsweise der Ortung und Navigation sowie die Erstellung der dafür notwendigen Karten erläutert werden. Es sollen darüber hinaus, auf Basis der während der Zeit gesammelten Erfahrungen, Ansätze und Ideen abgeleitet werden, um die Leistungsfähigkeit noch weiter zu steigern und näher an eine tatsächliche Serienanwendung zu bringen.

2 Navigation in der Urban Challenge

Eines der Aufgabengebiete des Instituts für Flugführung (IFF) im Team CarOLO war die Bereitstellung und Integration einer Ortungslösung für das Fahrzeug „Caroline“, um sämtliche Module im Rechnerverbund mit einem aktuellen Zustandsvektor des Fahrzeugs zu versorgen.

2.1 Verwendete Hardware

Für diesen Zweck wurde eine GPS/INS-Lösung für Navigations-, Regelungs- und Vermessungsaufgaben vom Typ iTraceRT-F200 der Firma iMAR GmbH verbaut. Das

GPS/INS besitzt faseroptische Kreisel, MEMS-Beschleunigungssensoren und einen integrierten L1/L2-Band-GPS-Receiver. Die zugehörige GPS-Antenne wurde von Novatel bezogen und ist ebenfalls in der Lage, parallel Korrekturdaten auf dem L1-Band zu empfangen. Als Lieferant für die Korrekturdaten wurde OmniSTAR ausgewählt, weil dieser global verfügbar ist und somit vorab in Deutschland getestet werden konnte. Durch Nutzung des OmniSTAR VBS-Dienstes kann der absolute Positionsfehler deutlich unter einen Meter gerechnet werden. Somit konnte ermittelt werden, in welcher Fahrspur sich das Fahrzeug aktuell befindet und es konnte der Forderung nachgekommen werden, weniger als 1m entfernt von einer Stopplinie zum Stehen zu kommen, ohne diese zwingend sehen zu müssen. Da in einer städtischen Umgebung regelmäßig mit einem kurz- und langzeitigem GPS-Ausfall gerechnet werden muss, wurde das GPS/INS mit einem Odometrie-Signal versorgt. Das ABS-Steuergerät des VW Passats liefert dafür ein geschwindigkeitsabhängiges Rechteck-Signal ohne Richtungs-Information.

2.2 EgoState

Der Zustandsvektor aus den Informationen über Ort, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Lagewinkel und Drehraten des Fahrzeugs für jeweils alle drei Dimensionen und einem zusätzlichen Zeitstempel wird in einer EgoState genannten Datenstruktur abgelegt. Angebunden ist die GPS/INS via privatem CAN, nachdem sich die Nutzung der USB-Schnittstelle als zu instabil erwiesen hat, und aktualisiert auf diesem Weg den EgoState mit 100 Hz. Ausgelesen wird die iTrace unter einem echtzeitfähigen Xenomai-Linux [1] auf demselben PC, der auch für die Fahrzeugregelung zuständig ist, um dem Regler den EgoState möglichst latenzfrei zur Verfügung zu stellen. Der EgoState wird über ein selbst entwickeltes Modul zur Interprozesskommunikation, das auch für den restlichen Datenaustausch aller Module zuständig ist, im Rechnerverbund verteilt.

2.3 Zeitliche Synchronisierung der PCs

Auch die zeitliche Synchronisierung des Rechnernetzes übernimmt die iTrace. Dafür wurde auf dem PC für die Fahrzeugregelung ein NTP-Server eingerichtet, mit dem sich die restlichen PCs des Fahrzeugs automatisch abgleichen. Als PC für den NTP-Server wurde der Rechner für die Fahrzeugregelung ausgewählt, da dieser für die Regelungsaufgaben die höchste Zeitgenauigkeit mit einem möglichst geringen Jitter benötigt. Auf den restlichen

Rechnern musste so nur noch ein NTP-Client konfiguriert werden, der automatisch die Uhr des jeweiligen Rechners, auf dem der Client läuft, aktualisiert. Die iTrace unterstützt zum einen den NMEA-Standard [2] mit dem auch ntpd [10] als NTP-Server umgehen kann und mit Hilfe dessen der Server die absolute Zeit mitgeteilt bekommt. Zusätzlich gibt die iTrace noch ein PPS-Signal aus (PPS = Puls pro Sekunde), wodurch dem Server mitgeteilt werden kann, wann genau die übermittelte Zeit gültig ist. PPS-Signal und NMEA-Nachrichten werden vom Rechner über die COM-Schnittstelle empfangen. Für diese Konfiguration ist ntpd für den Einsatz als NTP-Server bereits mit den nötigen Treibern ausgestattet. Die Zeitsynchronisierung und die Verteilung des EgoStates ist in Abbildung 1 dargestellt.

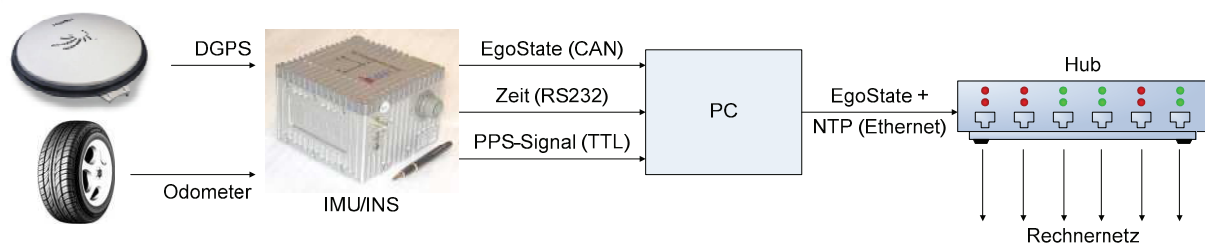


Abbildung 1: Verteilung des EgoState und der aktuellen Zeit

3 Karte in der Urban Challenge

Um sowohl den verschiedenen Sensortypen als auch dem zur Anwendung gekommenen DAMN-Ansatz [4] der KI gerecht zu werden, besitzt Caroline drei verschiedene Karten: eine topologische Karte, in der das verfügbare Straßennetz abgebildet wird und zwei geographische Karten, in denen die gefundenen Konturen der Sensorfusion bzw. die befahrbaren Bereiche gespeichert werden. Die geographischen Karten decken nur die aktuellen Sichtbereiche der Sensorik ab und dienen somit nur zur lokalen Navigation, da diese Informationen nicht länger gespeichert werden. Gründe für diese Entscheidung sind das hochdynamische Fahrzeugumfeld und der geringe Nutzen im Gegensatz zum hohen Aufwand, den es bedarf, um diese Informationen zum einen langfristig und zum anderen schnell verfügbar abzulegen.

3.1 RoadGraph

Der Aufbau des Straßennetzes wird von der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) als Wettkampfausrichter den einzelnen Teams in Form eines Road Network Definition File (RNDF) vorgegeben, wie es auch in Abbildung 2 zu sehen ist. Diese Datei enthält Informationen über die Straßen, auf denen sich die Fahrzeuge bewegen dürfen und Zonen, innerhalb derer das Fahrzeug frei navigieren kann und evtl. auch einparken muss. Beim Start einer Mission wird diese Datei geparkt und intern mit Hilfe der Boost-Bibliothek [5] als Datenstruktur mit dem Namen RoadGraph in Form eines gerichteten Graphen abgelegt. Die zu bewältigende Fahraufgabe wird dem Team von der DARPA mit einem Mission Definition File (MDF) mitgeteilt, in dem die der Reihe nach anzufahrenden Checkpunkte und Geschwindigkeitsbeschränkungen für einzelne Streckenteile enthalten sind. Der RoadGraph in Verbindung mit dem MDF dient der KI somit zur globalen Navigation, indem sie Wege durch den Graphen mit einem A*-Algorithmus [6] sucht. Die Knoten des RoadGraphs geben die WGS84-Koordinate eines Wegpunktes an und speichern zudem, ob sich hier ein Checkpunkt oder eine Stopplinie vor einer Kreuzung befindet. An den Kanten zwischen den einzelnen Knoten werden Informationen über Fahrbahnmarkierungen, Fahrspurbreite aus dem RNDF und die vermutete bzw. benötigte Zeit zwischen zwei Wegpunkten abgelegt. Der RoadGraph ist der einzige Ort, an dem sich das Fahrzeug Dinge über seine Umgebung, wie z.B. eine gesperrte Straße, längerfristig merkt, indem die Kosten für dieses Straßenstück für die nächste Wegsuche hier temporär stark angehoben werden.

Ein wichtiges Werkzeug für das Team wurde daher der selbstentwickelte RNDFMaker aus Abbildung 2, mit dem neue RNDFs erstellt und vorgegebene RNDFs nachbearbeitet werden können, sodass die Splines, die von der KI durch die einzelnen Wegpunkte gelegt werden, dem tatsächlichen Straßenverlauf folgen.

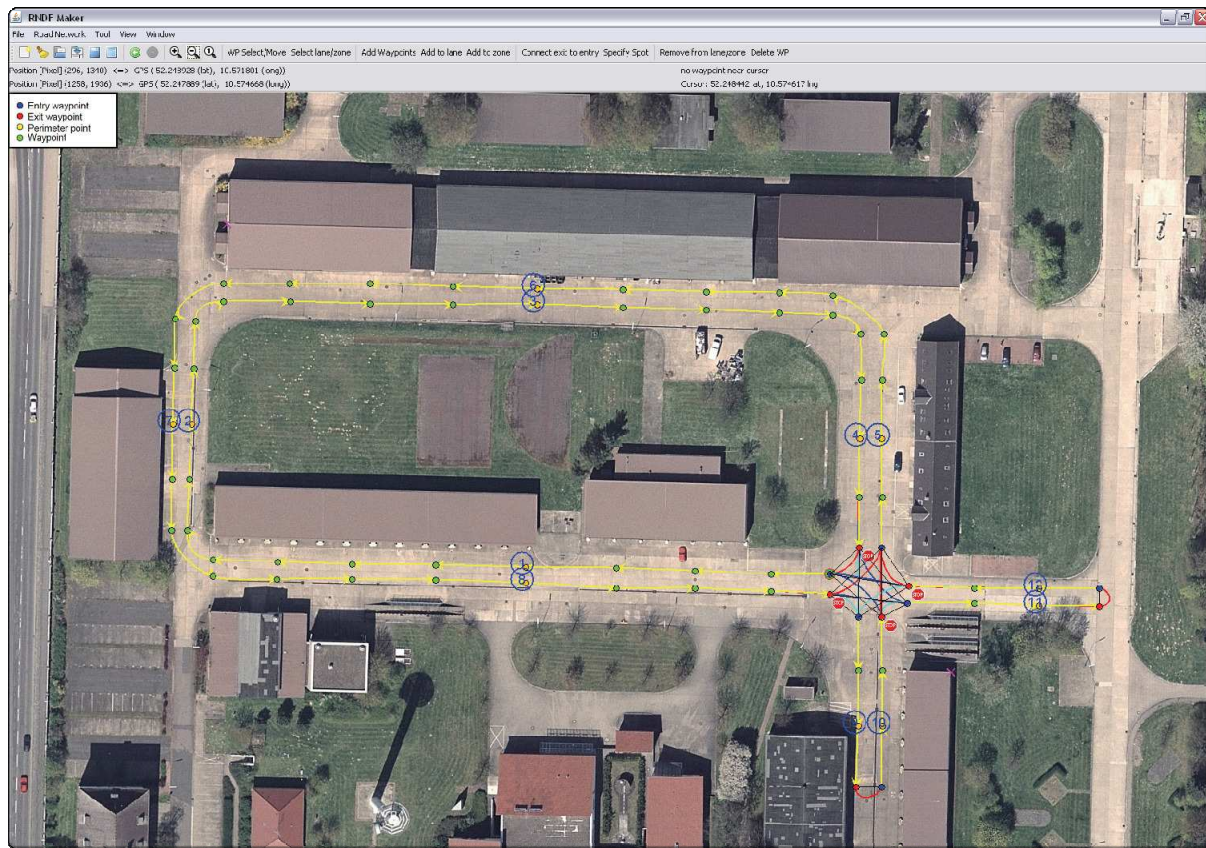


Abbildung 2: Visualisierung des RoadGraphs

3.2 Konturen

Der erste der beiden Sensorverbände deckt das vollständige Umfeld des Fahrzeugs in einer Fläche von etwa 400 m mal 100 m ab. In diesem Bereich werden Objekte durch die auf unterschiedlicher Technologie (RADAR, Laserscanner, LIDAR) beruhenden Sensoren erkannt und von der entwickelten Software zu Konturen zusammengefügt und verfolgt. Diese Konturen, die als weiße Linienzüge zusammen mit ihrer ID in Abbildung 3 zu sehen sind, werden der KI gesendet und beinhalten Informationen wie:

- Eindeutige ID
- Position der einzelnen Punkte der Kontur
- Gerichtete Geschwindigkeit
- Beschleunigung
- Winkelgeschwindigkeit der Bewegungsrichtung

- Zugehörige Unsicherheiten
- Art des Objekts: statisch, dynamisch, unbekannt

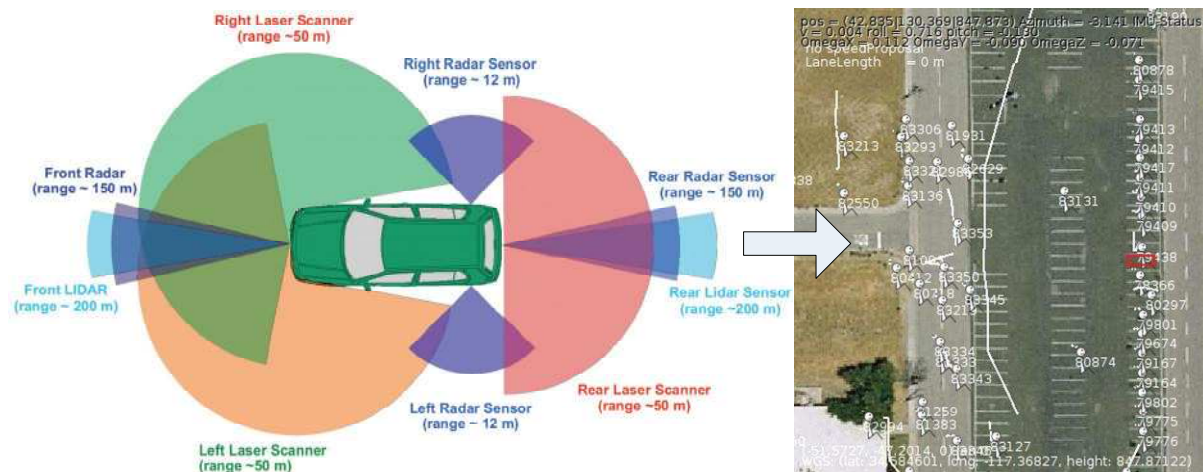


Abbildung 3: Sensorabdeckung und erkannte Konturen in einer Top-View-Karte

3.3 Befahrbarer Bereich

Das in Kapitel 3.2 beschriebene Sensorsystem hat zwei Schwächen, die dazu führen, dass es nicht genug Informationen liefert, um im städtischen Umfeld allein mit ihnen navigieren zu können. Es fehlt die Detektion von flachen Hindernissen wie Bordsteinkanten und es erkennt nicht den Unterschied zwischen einem asphaltiertem Straßenzug und Grünfläche oder Schotter daneben. Um dies zu kompensieren, wurde im Rahmen der Urban Challenge mit dem Ground Processor und Area Processor ein ähnliches System entwickelt, dass auch den Touareg der Universität Stanford bei der DARPA Grand Challenge 2005 sicher auf der Siegerstraße gehalten hat.

Während die vorherige Karte aus einer Liste aus Objekten besteht, wird die Befahrbarkeitsinformation der KI in Gridform in Weltkoordinaten übergeben, die von drei verschiedenen Sensorsystemen mit Daten versorgt wird. Abbildung 4 zeigt die Verarbeitungskette dieses Moduls. Diese Karte in Form eines Grids wird von drei verschiedenen Sensorsystemen mit Daten versorgt. Eine der beiden Vorstufen der Karte wird durch zwei Sick Laserscanner und ein Stereokamera-System erzeugt, die jeweils 3D-Scan-Daten liefern. Zusätzlich liefert die Stereokamera noch ein Höhengitter inklusive einer Klassifizierung (Bordsteinkante, Straße, etc.) der einzelnen Gitterpunkte. Die beiden Sick LMS-291 Laserscanner mit einer Scan-Ebene sind über der Windschutzscheibe angebracht

und tasten den Untergrund im Abstand von 10m und 20m vor dem Fahrzeug ab. Der Sichtbereich der Scanner ist per Software auf 120° beschränkt. Die Stereokamera ist hinter der Windschutzscheibe auf Höhe des Rückspiegels montiert. Aus den Scan-Punkten beider Sensoren wird zuerst eine Höhenkarte des Bereichs vor dem Auto erstellt und daraus ein Gradientenfeld gebildet. Die Nick- und Rollbewegungen des Fahrzeugs müssen hier mit Hilfe der GPS/INS-Daten herausgerechnet werden.

Ein weiteres Modul, das mit Hilfe einer IDS Farbkamera den Boden vor dem Fahrzeug auf seine Farbe hin untersucht, nennt sich Area Processor. Dabei wurde hier der Grundgedanke der Universität Stanford [7] übernommen, befahrbare von nicht befahrbaren Bereichen anhand ihrer Farbwerte zu unterscheiden und an urbane Umgebungen angepasst. Dazu wird angenommen, dass Teile des Bildes als befahrbar angenommen werden können, und anschließend in Echtzeit für die restlichen Pixel im Bild der Euklidische Abstand des Farbwerts zum mittleren Farbwert des befahrbaren Bereichs errechnet wird. Durch ein bewegliches Polygon, das im Bild nach befahrbaren Bereichen sucht, konnten die Ergebnisse noch weiter verbessert werden. Weiterhin klassifiziert der Algorithmus spezielle Bereiche wie Fahrspurmarkierungen und starke Schatten im Bild als unbekannt.

Schließlich werden beide Grids zu einem Grid zusammengeführt und jede Zelle mit Hilfe eines Dempster-Shafer-Algorithmus [8], [9] als befahrbar, unbefahrbar oder unbekannt bewertet.

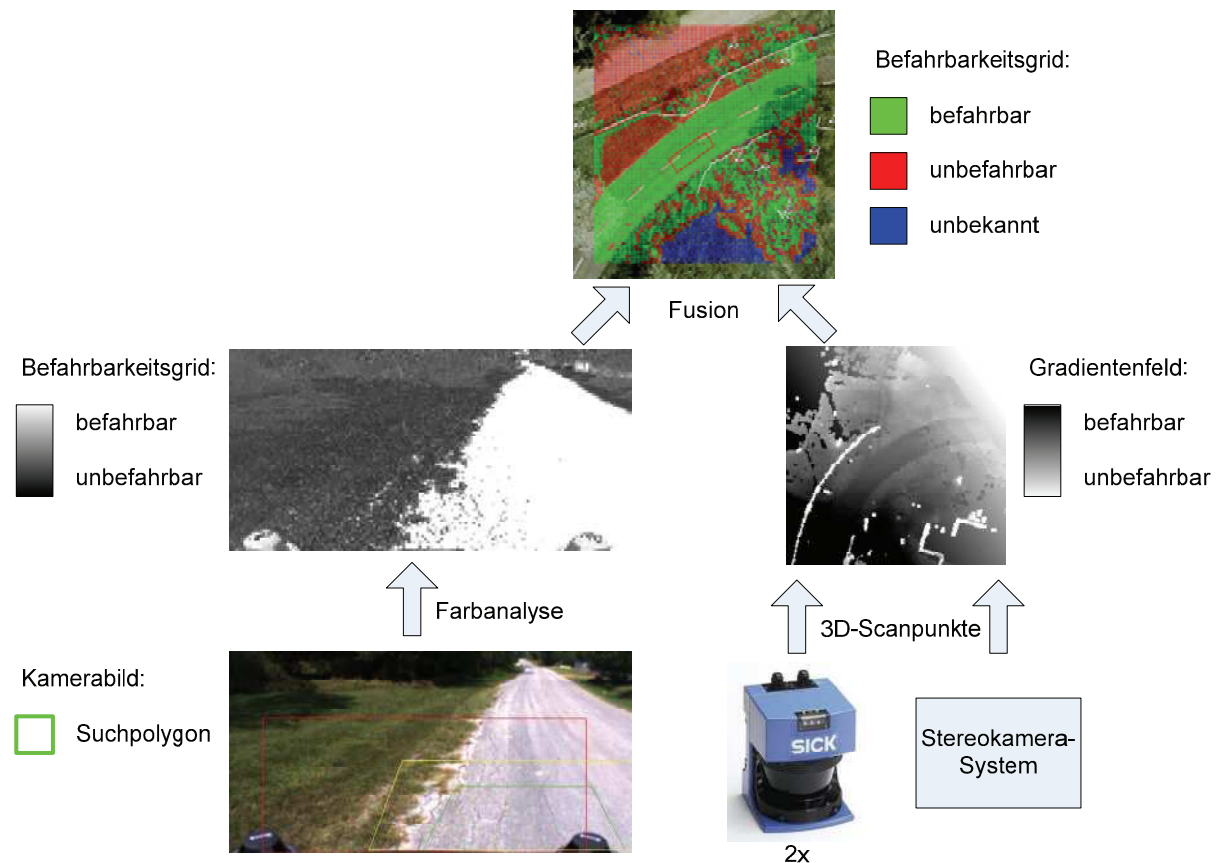


Abbildung 4: Verarbeitungskette des Ground Processors

3.4 Übersicht

Zum Ende des Kapitels soll mit Hilfe von Abbildung 5 noch einmal ein kurzer Überblick darüber gegeben werden, wie die unterschiedlichen Kartenzulieferer an die KI angebunden sind und wie diese Daten innerhalb der KI verarbeitet werden. Im linken Bereich der Abbildung sind die Dateien mit den Informationen über die abzufahrende Mission und das zugehörige Straßennetz zu sehen. Beide werden direkt von der KI von einem USB-Stick gelesen und verarbeitet. Des Weiteren ist dargestellt, dass die Umfeldsensorik via CAN vom zugehörigen DAQ-Modul ausgelesen wird und anschließend von der Data Fusion Unit zu einzelnen Konturen zusammengefügt wird. Diese Daten werden daraufhin zur KI gesendet. Zuletzt sind noch die Anbindung und der Aufbau der Module zur Bestimmung des befahrbaren Bereichs abgebildet.

Dass diese Informationen nicht in einer Karte zusammengeführt werden, ist durch die Verwendung des DAMN-Ansatzes durch die KI begründet. Dieser verlangt, dass für jede Eingangsgröße ein sogenanntes Behaviour existiert, dessen Aufgabe es ist, die zu

untersuchenden Bahnstücke anhand ihrer Eingangsinformation zu bewerten. Zusätzlich muss für jede Ausgangsgröße ein Arbiter vorhanden sein, der die Bewertungen der einzelnen Behaviour gewichtet miteinander verknüpft. Diese Ausgangsgrößen sind in diesem Fall Geschwindigkeit und Lenkwinkel aus denen der TrajectoryBuilder einen Fahrschlauch generiert, der von der KI an die Fahrzeugregelung gesendet wird. Weitere, hier nicht zu sehende Eingangsgrößen, sind der EgoState und die Fahrspur.

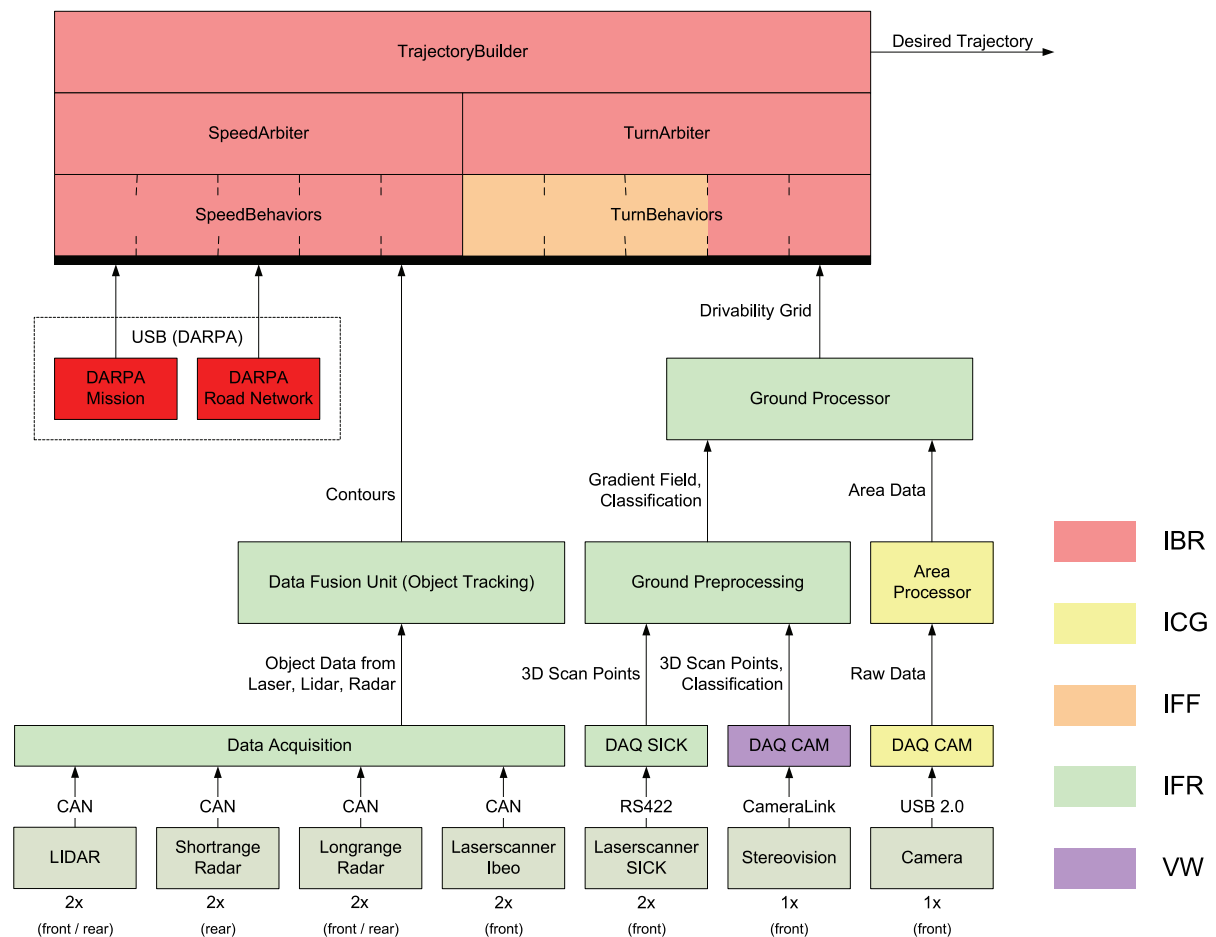


Abbildung 5: Ausschnitt der Systemarchitektur

4 Blick in die Zukunft

Aus den im CarOLO Projekt gesammelten Erfahrungen ergeben sich, nicht nur aus Sicht der Ortung und Navigation, eine Vielzahl von innovativen Ideen und Ansätzen, den geschaffenen Stand der Technik weiter zu entwickeln. Diese lassen sich zu Schwerpunkten zusammenfassen, können jedoch nicht unabhängig voneinander betrachtet werden.

4.1 Sensoren

Die bislang in Caroline zum Einsatz gekommene Ortungsarchitektur besteht, wie in Abschnitt 2.1 dargelegt, im Kern aus einer GPS/INS Integration. Damit wurde im Wesentlichen darauf verzichtet, das Potential, welches mit fahrzeugeigenen Sensoren verbunden ist, voll auszuschöpfen. Ferner sind mit der Nutzung des verhältnismäßig hochwertigen iTraceRT-F200 Systems zwei Nachteile verbunden. Zum einen stellt das Gerät mit einem Anschaffungspreis von ca. 72.000 Euro die teuerste Einzelkomponente im Fahrzeug dar. Des Weiteren kann die Ortungslösung in Bereichen ohne GPS Empfang aufgrund des anwachsenden Fehlers nur in einem begrenzten Umfang weiter genutzt werden.

Um auf der einen Seite dem Problem der Sensorkosten zu begegnen, muss angestrebt werden, die iTraceRT-F200 durch eine deutlich günstigere MEMS-IMU und einen low-cost GNSS-Empfänger zu ersetzen. Dies wiederum führt zu einer Verstärkung des zweiten Problems, da eine derartige low-cost IMU in ungestützter Form nicht für die Primärnavigation eingesetzt werden kann. Somit ist es erforderlich, deutlich stärker als bislang, fahrzeugeigene aber auch Umfeldsensorik in die Bestimmung der Ortungslösung mit einzubeziehen. Beispielsweise kann ein Wegdriften der Position in Bereichen ohne GPS Verfügbarkeit durch eine Kopplung mit Umfeldsensoren (Lidar, Kamera) verhindert werden [10]. Ferner würde der Einsatz eines GPS Mehrantennensystems dazu beitragen, in Bereichen guter GPS Sichtbarkeit die durch die MEMS-IMU entstandenen Nachteile zum Teil auszugleichen.

4.2 Fusion

Die soeben skizzierte Aufweitung des Sensorspektrums macht es erforderlich, die gestiegene Komplexität auch bei der Betrachtung der Fusionsalgorithmen zu berücksichtigen. Das heißt, insbesondere einem nichtlinearen Sensorverhalten und einer komplexeren Fehlercharakteristik Rechnung zu tragen. Die logische Konsequenz dieser entstehenden Randbedingungen ist die Nutzung nichtlinearer aber auch nichtparametrischer Filterkonzepte, die ihrerseits wiederum die Frage der Echtzeitfähigkeit solcher Systeme stärker in den Vordergrund stellen.

Neben der Frage der Fusionsalgorithmik ist die Tiefe der Integration einzelner Sensoren entscheidend für die erreichbare Leistungsfähigkeit des Ortungssystems. Somit lässt sich beispielsweise ein optimaler Umgang mit GPS Mehrwegeinflüssen nur mit Hilfe von Systemen erreichen, in denen der Korrelationsprozess im Empfänger Bestandteil der Fusion

ist bzw. von der Fusion beeinflusst werden kann (Deep Coupled) [11]. Derartige Umstände bringen es mit sich, dass zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich deutlich hardwarenäher erfolgen müssen. Dies bringt jedoch auch die Möglichkeit einer stärkeren physikalischen Integration mit sich.

4.3 Integrität

Insbesondere im Automotive Bereich sind deutlich und stetig steigende Anforderungen an die Ortung zu verzeichnen. Dieser applikationsgetriebene Trend spiegelt sich vor allem in Forderungen nach höherer Genauigkeit und Verfügbarkeit wieder. Da die entsprechenden Applikationen aber zusehends sicherheitskritische Aufgaben übernehmen, um den Fahrer zu entlasten, rückt die Frage nach der Integrität der Ortungslösung mehr und mehr in den Vordergrund.

Ähnliche Fragestellungen existieren aber auch in anderen Anwendungsbereichen der Satellitennavigation. So gibt es beispielsweise in der Luftfahrt mit dem Ground Based Augmented System (GBAS) bereits ein zertifizierungsfähiges, satellitengestütztes Landesystem, welches die empfängerseitige Überprüfung der Integrität einer Ortungslösung bis hin zur Standardisierung vorangetrieben hat. Es ergibt sich somit die Fragestellung, inwieweit derartige Algorithmen und Ansätze in den Automotive Bereich übertragen und ausgebaut werden können. Ziel sollte auch hier die Schaffung internationaler Standards sein.

4.4 Karte

Parallel zu den Entwicklungen im Bereich der Bestimmung einer genaueren und quasikontinuierlich verfügbaren Ortungslösung, wachsen auch die Anforderungen an die zur Anwendung kommende digitale Karte. Neben der Auflösung und Detailtiefe ergeben sich hier im Zusammenhang mit sicherheitskritischen Applikationen auch neue Fragestellungen. So kann eine Karte beispielsweise zukünftig Bestandteil der Integritätsrechnung sein und unterliegt somit auch entsprechenden Anforderungen. Hier spielt vor allem die Aktualität der genutzten Informationen eine wesentliche Rolle. Ferner sinkt mit wachsendem Informationsumfang auch die Zugriffsgeschwindigkeit.

4.5 Zusammenfassung

Insgesamt lassen sich aus diesen Betrachtungen zwei wesentliche Entwicklungstrends ableiten. Zum einen muss ein schrittweiser Austausch von high-end Sensoren und GPS Empfängern durch seriennahe low-cost Geräte erfolgen. Zum anderen können die geforderte Ortungsgenauigkeit sowie eine hohe Verfügbarkeit dieser Information nur durch eine tiefere Integration der einzelnen Sensorkomponenten erreicht werden.

5 Literatur

- [1] Xenomai: Real-Time Framework for Linux, online: <http://www.xenomai.org>
- [2] NMEA - National Marine Electronics Association, online:
<http://www.nmea.org/pub/0183/>
- [3] ntpd - Network Time Protocol (NTP) daemon, online:
<http://www.eecis.udel.edu/~mills/ntp.html>
- [4] J. Rosenblatt, “Damn: A distributed architecture for mobile navigation”, Ph.D. dissertation, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Januar 1997
- [5] Boost C++ Libraries, online: <http://www.boost.org/>
- [6] R. Dechter, J. Pearl, “Generalized best-first search strategies and the optimality of A*”, Journal of the ACM 32 (3):, pp. 505 – 536, 1985
- [7] S. e. a. Thrun, “Stanley: The robot that won the DARPA grand challenge”, Stanford University, Stanford, Tech. Rep., 2005
- [8] G. Shafer, “A Mathematical Theory of Evidence”, Princeton University Press, 1976
- [9] “Perspectives on the theory and practice of belief functions”, International Journal of Approximate Reasoning, no. 3, pp. 1-40, 1990

[10] Soloviev, D. Bates, F. van Graas, “Tight Coupling of Laser Scanner and Inertial Measurements for a Fully Autonomous Relative Navigation Solution”, Journal of Navigation, S. 189-205, Herbst 2007

[11] W. Parkinson, J. J. Spilker, “Global Positioning System: Theory and Applications”, Vol. 1, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996

6 Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem	IfR	Institut für Regelungstechnik
CAN	Controller Area Network	IMU	Inertial Measurement Unit
DAMN	Distributed Architecture for Mobile Navigation	INS	Inertial Navigation System
DAQ	Data Acquisition	KI	Künstliche Intelligenz
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	LIDAR	Light Detection And Ranging
GBAS	Ground Based Augmentation System	MEMS	Micro Electro Mechanical Sensor
GNSS	Global Navigation Satellite System	NMEA	National Marine Electronics Association
GPS	Global Positioning System	NTP	Network Time Protocol
IBR	Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund	PPS	Puls pro Sekunde
ICG	Institut für Computergraphik	USB	Universal Serial Bus
IFF	Institut für Flugführung	VW	Volkswagen